

水平管内におけるスラリーの非均質流動に関する研究

著者	崔 玉順
号	1334
発行年	1990
URL	http://hdl.handle.net/10097/6607

氏 名	Cui	Yu	Shun
	崔	玉	順
授 与 学 位	工 学 博 士		
学位授与年月日	平成 3 年 3 月 28 日		
学位授の与根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 資源工学専攻		
学 位 論 文 題 目	水平管内におけるスラリーの非均質流動に関する研究		
指 導 教 官	東北大学教授 千田 侑		
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 千田 侑	東北大学教授 松岡 功	
	東北大学教授 斎藤正三郎	東北大学助教授 益山 忠	

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 結 論

水平管によるスラリーの輸送においては、管路の摩耗および閉塞防止のため、輸送速度は一般に粒子が浮遊懸濁状態にて輸送されるように定めることが望ましい。しかし、沈降性スラリーを浮遊懸濁状態で輸送するためには、過大な輸送動力を必要とする。従って、沈降性スラリーの場合には、輸送動力の観点から、輸送速度は浮遊限界速度以下の範囲に選定される。それゆえ、流れは摺動層あるいは堆積層を伴う非均質流動となり、また、このような流れにおいては、流速や濃度などの変化によって管底部を流動する粒子の状態が変化し、時には、管閉塞に至ることもある。従って、沈降性スラリーの輸送を経済的にかつ安全確実にを行うためには、管内流れの流動状態、特に管内濃度、堆積限界速度ならびに水力勾配について熟知する必要がある。

さて、管内濃度に関する従来の研究では、スラリーの流動状態とは異なる仮定を設けたり、粒子に働く力あるいは粒子の拡散係数の評価について明示されていないなど、これらの式を種々の輸送条件に適用することは困難である。また、堆積限界速度に関する研究においては、推察より定めた関連因子ならびに実験結果より相関式が求められている。そのため、これらの式が得られた輸送条件と異なる場合には、計算値は実験値より外れる場合が多く見られる。一方、水力勾配については、吐出濃度、圧力損失係数およびフルード数を用い、水力勾配をマクロ的に捉えた研究成果があるが、これらの成果は研究者によって異なっている。それゆえ、水力勾配を詳細に検討する場合には、水力勾配が管内濃度ならびにスラリーの流動状態などと密接に関連していることから、吐出濃度とともに管内濃度をも用いるべきであると考えられる。

よって、本研究は、沈降性スラリーの流動機構の解明に必要とされる粒子群の干涉終末速度、管内濃度と吐出濃度との比、すなわち濃度比ならびに管内濃度分布などの考察を基に、摺動層を伴う流れおよび堆積層を伴う流れの水力勾配ならびにこれらの流れの境界である堆積限界速度の推定方法を提示するとともに、これらと輸送条件との関係を明らかにし、沈降性スラリーのパイプライン輸送システムの設計に寄与することを目的としたものである。

第2章 粒子の終末速度、濃度比ならびに管内濃度分布の算定方法に関する研究

粒子の終末速度、濃度比ならびに管内濃度分布を把握することは沈降性スラリーの流動状態および水力勾配を明らかにする上で極めて重要である。それゆえ、本章では、まず粒子の形状を評価し得る面積指数 κ を用いて、Swanson の終末速度の式中の形状係数 α 、 β と粒子の形状との関係および粒子群の干涉終末速度の式、すなわち Richardson-Zaki の式中の指数 n と粒子レイノルズ数 R_{ep} との関係について考察し、これらの関係はそれぞれ次のように表されることを示した。

$$\alpha = 0.270e^{0.923\kappa}$$

$$\beta = 15.1e^{-1.04\kappa}$$

$$n = \frac{2.33R_{ep}^+ (\alpha + R_{ep}^+)}{R_{ep}^+ (\alpha + R_{ep}^+) - 2\sqrt{48\alpha\beta/R_{ep}}}$$

ここに、 $R_{ep}^+ = \sqrt{\alpha^2 + 4\sqrt{48\alpha\beta/R_{ep}}}$ である。

次に、粒子群の相互干涉力および粒子の運動方程式より、浮遊・分散状態で流送される固体粒子の管内平均濃度 \bar{q}_s の算定式として次式を求め得た。

$$\left(\frac{\bar{q}_s C_s}{\bar{q}_s (1 - \bar{q}_s)} \frac{V_{ws}}{V_t} \right)^2 \frac{\{ \alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4\sqrt{48\alpha\beta\bar{q}_s(1 - \bar{q}_s)} V_t / [V_{ws}(\bar{q}_s - C_s) R_{ep}]^2} \}^2}{\{ \alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4\sqrt{48\alpha\beta/R_{ep}}} \}^2} + (1 - \bar{q}_s)^{2(n-1)} \frac{\{ \alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4\sqrt{48\alpha\beta\bar{q}_s(1 - \bar{q}_s)} V_t / [V_{ws}(\bar{q}_s - C_s) R_{ep}]^2} \}^2}{\{ \alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4\sqrt{48\alpha\beta/R_{ep}}} \}^2} - 1 = 0$$

また、摺動層および堆積層を伴う流れの管内平均濃度はそれぞれ次式より求められることを示した。

$$\bar{q} = \frac{1}{A} \{ \bar{q}_s A_s + \bar{q}_{sb} A_{sb} \}$$

$$\bar{q} = \frac{1}{A_0} \{ \bar{q}_s A_s + \bar{q}_{sb} A_{sb} + \bar{q}_{sb} A_b \}$$

さらに、粒子間の相互影響ならびに流体の拡散と粒子の拡散との違いを考慮し、次の管内濃度分布方程式を得た。

$$\xi \varepsilon \frac{dq}{dz} + V_h q = 0$$

ただし、 $\varepsilon = (8/81)(1 - h_r)DV_*k$

$$\xi = \left(-12.6 + 307\sqrt{\frac{d_s}{D}} + 30e^{-35\sqrt{d_s/D}} \right) [(1-C)^n]^{0.86} \left(\frac{V_*}{V} \right)^{0.76} \left(\frac{V_*}{\sqrt{gd_s(S-1)}} \right)^{0.97} C_{D0}^{-0.24}$$

上述の一連の式による粒子の終末速度，干涉終末速度，濃度比および管内濃度分布の計算値と実験値および文献値との比較検討により，これらの式は比較的広い流動範囲の実験値を説明し得ることを確かめた。

第3章 沈降性スラリーの堆積限界速度の推定方法に関する研究

摺動層あるいは堆積層を伴う流れでは，粒子の管内分布状態ならびに水力勾配に関する因子が異なるゆえ，水力勾配を推定する際には，スラリーの流動様式を判別し，その流動様式に対応した算定式を用いる必要がある。それゆえ，本章においては，これらの2つの流れ様式を判別する堆積限界速度について検討した。

すなわち，堆積限界時における堆積層内の粒子群に働く力を調べ，次元解析より，次の堆積限界速度の基礎式を得た。

$$F_L = K_1 C^a [(1-C)^n]^b C_{D0}^c (d_s/D)^f$$

また，粗粒子スラリーの堆積限界速度の実験値および文献値を基に，堆積限界速度の修正フルード数 F_L に及ぼす諸因子の影響について調べ，粗粒子スラリーの堆積限界速度の推算式として次式を得た。

$$F_L = 0.55 \kappa^{0.8} C^{0.25} \{(1-C)^n\}^{2.6} (d_s/D)^{-0.29}$$

上式および従来の研究による堆積限界速度の計算値と実験値および文献値との比較より，上式は従来の研究よりも広い流送条件における実験値をよりよく説明し得ることを明らかにした。

さらに，スケールアップにおける堆積限界速度の推算について検討し，基礎式を基にした補外法による計算値は実測値をよく表しうることを確認した。

第4章 摺動層および堆積層を伴う流れの水力勾配に関する理論的研究

水力輸送システムを設計する場合，輸送動力，管路摩耗，管閉塞など経済性ならびに安全性について検討する必要があるが，これらはいずれも水力勾配と関係している。また，沈降性スラリーの場合には，流れは摺動層あるいは堆積層を伴う流れとなることから，本章ではこれらの流れの水力勾配について理論的に検討した。すなわち，スラリーを輸送するのに必要な仕事率を前章までの研究成果を用いて検討し，摺動層および堆積層を伴う流れにおける水力勾配の算定式をそれぞれ次のように求め得た。

$$\begin{aligned} i_m = & \lambda_w \frac{V^2}{2Dg} + 2(S-1) \frac{V_t}{VA} \int_{hm}^D (1-q)^n q \sqrt{Z(D-Z)} dZ \\ & + \frac{3}{8} \left(\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \frac{4\sqrt{48} \alpha \beta}{V_{ws} d_s \rho / \mu} \frac{\bar{q}_s(1-\bar{q}_s)}{\bar{q}_s - C_s}} \right)^2 \frac{1}{A} \\ & \times \frac{V_{ws}^2}{d_s g} \left(\frac{\bar{q}_s - C_s}{\bar{q}_s(1-\bar{q}_s)} \right)^2 \frac{C_s}{\bar{q}_s} \int_{hm}^D q \sqrt{Z(D-Z)} dZ \\ & + \bar{q}_s (S-1) K_{sm} \frac{A_s}{A} \frac{(V_{ws} - V_{sb})}{V} + \bar{q}_{sb} (S-1) K_{sp} \frac{A_{sb}}{A} \frac{V_{sb}}{V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
i_m = & \left(\lambda_w \frac{U_w}{U} + \lambda_s \frac{U_s}{U} \right) \frac{V_t^2}{8Rg} + 2(S-1) \frac{V_t}{VA} \int_{hl}^D (1-q)^n q \sqrt{Z(D-Z)} dZ \\
& + \frac{3}{8} \left(\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \frac{4\sqrt{48} \alpha \beta}{V_{ws} d_s \rho / \mu} \frac{\overline{q_s} (1 - \overline{q_s})}{\overline{q_s} - C_s}} \right)^2 \frac{1}{A} \\
& \times \frac{V_{ws}^2}{d_s g} \left(\frac{\overline{q_s} - C_s}{\overline{q_s} (1 - \overline{q_s})} \right)^2 \frac{C_s}{\overline{q_s}} \int_{hl}^D q \sqrt{Z(D-Z)} dZ \\
& + \overline{q_s} (S-1) K_{sm} \frac{A_s}{A} \frac{(V_{ws} - V_{sb})}{V} + \overline{q_{sb}} (S-1) K_{mb} \frac{A_{sb}}{A} \frac{V_{sb}}{V}
\end{aligned}$$

第5章 摺動層および堆積層を伴う流れの水力勾配に関する実験的研究

前章で得られた摺動層および堆積層を伴う流れの水力勾配の算定式の適合性について検討するため、これらの流れにおける水力勾配を実験的に調べるとともに、これらの算定式を用いる際に必要な浮遊限界速度、摺動層の高さについて考察を行った。すなわち、粒子を浮遊させる流体のうず力に関連する因子、すなわち $(1-C)^n$ ならびに浮遊に関与する諸因子と浮遊限界速度との関係を調べ、浮遊限界速度の算定式として次式を得た。

$$V_t = 18.0 C^{0.28} [(1-C)^n]^{-0.16} \left(\frac{d_s}{D} \right)^{0.3} \left[\frac{V_t}{\sqrt{g d_s (S-1)}} \right]^{0.11} \sqrt{g D (S-1)}$$

また、既往の摺動層高さに関する実験結果を基に、摺動層の角度 θ と流送条件との関係について検討し、摺動層高さ h_m の算定式として、次式を与えた。

$$\begin{aligned}
h_m &= D \{1 - \cos(\theta)\} / 2 \\
\theta &= 2.0 C^{0.08} \left(\frac{V}{\sqrt{2gD(S-1)}} \right)^{-1.3} \left(\frac{(1-C)^n V_t}{V} \right)^{-0.67} \left(\frac{d_s}{D} \right)^{0.64}
\end{aligned}$$

次に、摺動層ならびに堆積層を伴う流れの水力勾配に関する一連の式による水力勾配の計算値と実験値および文献値との比較より、これらの算定式は実験結果をよく説明しうることが分かった。また、これらの式の適用条件を調べたところ水力勾配の計算値の偏差を15%とするならば、径比 $d_s/D < 0.1$ であることが確認された。

第6章 結 論

以上、本研究は粒子の終末速度、粒子群の干涉終末速度、濃度比、管内濃度分布などを理論的に調べ、かつ、その結果を踏まえ、堆積限界速度ならびに摺動層および堆積層を伴う流れの水力勾配について理論的ならびに実験的検討を加えるとともに、これらの推定方法を提示したものである。その結果、水平管内における沈降性スラリーの管内濃度分布、堆積限界速度ならびに摺動層および堆積層を伴う流れの水力勾配の算定を可能にし、かつ、これらに関する基礎資料を得たことは、沈降性スラリーのパイプライン輸送システム設計に指針を与えたことになり、水力輸送の発展に工学的寄与したものと考える。

審 査 結 果 の 要 旨

固体粒子の水力輸送において、粉碎費及び脱水費の軽減を目的として、粗粒子スラリー、すなわち、沈降性スラリーの輸送が注目され、動力費の観点から、その輸送速度を、堆積層が消滅し摺動層を伴う流れとなる速度の近傍に設定することが試みられている。このため、スラリーの流れは非均質流動を呈し、輸送濃度などの条件が急変した場合には管閉塞を生じる恐れがある。管閉塞の防止並びに水力勾配の推定のためには、輸送条件との関連のもとに、スラリーの流動状態を把握する必要がある。

本論文は、沈降性スラリーの水平管内非均質流動状態の判別及び水力勾配の算定方法に関する一連の研究成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、粒子の終末速度並びに管内濃度の算定方法に関する研究を述べている。すなわち、Swansonの形状係数と面積指数との関係から非球形粒子の終末速度の算定法を提案するとともに、粒子群の干渉終末速度の算定に用いられるRichardson-Zaki式中の指数を粒子レイノズル数と面積指数との関数として求められている。さらに、上述の干渉終末速度をO'Brienの式に導入し、管内濃度分布の推定を可能にした。これらの方法から求めた値は文献値と極めて良い一致を示した。これらは有用な知見である。

第3章では、沈降性スラリーの堆積限界速度の推定法に関する研究を述べている。すなわち、堆積層に働く力の理論的考察より、堆積限界速度の推定基礎式を示し、実験値及び文献値による解析から、従来のものに比べ適用範囲の広い相関式を求めている。これは工学的に有用な成果である。

第4章では、摺動層及び堆積層を伴う流れの水力勾配に関する理論的研究を述べている。すなわち、前章までの成果を基に、スラリーの仕事率を理論的に検討し、水力勾配の算定式を求めるとともに、その計算手順を示している。

第5章では、前章で得られた理論的解析の結果を検証するための実験的研究を述べている。すなわち、その実験結果は前述の算定式による計算結果と良く一致することを明らかにし、さらに、摺動層の高さ及び摺動層を伴う流れの上限である浮遊限界速度の算定式を求めている。これは優れた成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、水平管内におけるスラリーの非均質流動状態の判別および水力勾配について理論的並びに実験的研究を行ったもので、沈降性スラリーの水力輸送システムのより安全な設計を可能ならしめたことは、資源工学並びに混相流工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。